

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ СЕКВЕСТРАЦИИ CO<sub>2</sub>

This article discusses the problem of carbon dioxide utilization. The use of sequestration technology in the world is described. The possibility of enhanced oil recovery with CO<sub>2</sub> is being considered.

Ежегодный прирост концентрации диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) в воздухе приводит к увеличению глобальных температур поверхности Земли. В последние годы прирост содержания CO<sub>2</sub> в воздухе составляет до 4 ppm/год. В 2020 году атмосферный углекислый газ впервые за долгое время достиг концентрации свыше 415 мл/м<sup>3</sup> и составил 417,1 мл/м<sup>3</sup> [1]. Наибольшее увеличение выбросов CO<sub>2</sub> за период с 1990 по 2019 гг. зафиксировано в странах Азии – с 4789 до 15879 млн т в год (в 3,3 раза), в то время, как в Европе произошло снижение с 4401 до 3673 млн т CO<sub>2</sub>. В 2019 г. Россия занимала четвертое место в мире по выбросам углекислого газа [2]. Динамика выбросов CO<sub>2</sub> в РФ представлена в табл. 1.

Таблица 1

Динамика выбросов CO<sub>2</sub> за период (1990–2019 гг.), млн т

Годы	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Выбросы CO <sub>2</sub>	2189	1583	1521	1548	1609	1592	1754
Темпы роста, %	-	72,3	96,1	101,8	103,9	98,9	110,2

Составлено авторами на основе данных [2]

Технология секвестрации углекислого газа (улавливание и захоронение CO<sub>2</sub> – Carbon capture and storage – CCS) считается весьма перспективным направлением для улучшения экологической ситуации в мире. Целью работы является анализ использования данной технологии в мире и выявление возможности ее применения для интенсификации добычи нефти в России.

В настоящее время уже предлагаются пилотные проекты по улавливанию CO<sub>2</sub> прямо из атмосферного воздуха с получением сжатого жидкого газа физико-

химическими методами с использованием гидроксида кальция [3]. Однако реализуемые и планируемые мировые проекты CCS основаны на улавливании и захоронении прежде всего техногенного углекислого газа, образующегося при сжигании углеродного топлива (угля, нефти, газа) на предприятиях энергетики и в качестве побочного продукта в производствах других отраслей национальной экономики [4, 5].

Проекты CCS реализуются в более 30 странах мира, в разных частях света – в Европе, Северной и Южной Америке, Австралии и Азии [5]. Лидирующие позиции занимает США, среди стран ЕС можно выделить Норвегию, в Азии – Китай. Интерес к данной технологии растет с каждым годом во многих странах, ведется много научных исследований и опытно-промышленных испытаний по ее совершенствованию на разных стадиях: по способу захвата диоксида углерода, его транспортировки и использования (захоронения) в зависимости от вида источников  $\text{CO}_2$  и места утилизации.

Применение технологии секвестрации  $\text{CO}_2$  может дать дополнительный экономический эффект в случае использования газа для повышения нефтеотдачи при разработке нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами или находящихся на поздних стадиях добычи. Закачка  $\text{CO}_2$  в пласт снижает вязкость тяжелых фракций нефти до 20–30 % (табл. 2) и также способствует разрыву и отмывке плёночной нефти, которая покрывает зерна пород, уменьшая риск разрыва водной пленки.

Образовавшаяся в результате этой реакции угольная кислота растворяет породы пласта или увеличивает их проницаемость. В результате капли нефти при низком межфазном натяжении становятся подвижнее (что позволяет дополнительно извлечь из пласта до 15 % залегающей нефти) и более устойчивыми к агломерации. Такой метод интенсификации добычи нефти имеет высокий потенциал, поскольку легкоизвлекаемые запасы уже исчерпаны и ведутся разработки более сложных месторождений в отдаленных районах с суровым климатом. При использовании традиционных технологий извлечения

нефти, в нефтеносных пластах сосредоточено от 30 % до 70 % остаточного рассеянного сырья, они не позволяют охватить все пропласты.

Таблица 2

Снижение вязкости нефти при закачке CO<sub>2</sub> [6]

Нефть	Давление, МПа	Температура, °C	Содержание CO <sub>2</sub> , % масс.	Вязкость, мПа·с
Экспериментальная скважина до обработки CO <sub>2</sub>	0,1	20,0	-	481,6
	0,1	25,7	-	330,9
	0,1	46,0	-	103,5
Экспериментальная скважина после обработки CO <sub>2</sub>	12,9	25,7	5	217,3
	12,9	25,7	20	76,9
	12,9	25,7	40	35,2

Остаточную нефть можно вытеснить рабочими агентами, которые имеют очень низкое межфазное натяжение на границе раздела фаз «нефть – вытесняющий агент». Вытеснение высоковязкого сырья при таких условиях возможно при использовании диоксида углерода. Закачка CO<sub>2</sub> в нефтяной пласт позволяет сократить энергетические затраты, интенсифицировать добычу сырья и исключить риск образования газовых гидратов.

Метод повышения нефтеотдачи на основе технологии CSS начал применяться в 70-х гг. прошлого столетия в США и позволяет извлекать дополнительные объемы нефти, которые с каждым годом повышаются с увеличением количества реализуемых проектов [4, 7]. Что касается России, то в 80-х годах двадцатого века на некоторых месторождениях Самарской области был осуществлен крупный эксперимент по закачке CO<sub>2</sub> в нефтяные пласты с использованием нагнетательных скважин [7, 8].

Показатели реализации этого проекта приведены в таблице 3.

В результате проведения опытно-технологических работ по закачке CO<sub>2</sub> на Радаевском (закачен наибольший объем CO<sub>2</sub>) и Сергеевском нефтяных месторождениях установлено, что данный метод обладает достаточно высокой

технологической эффективностью: за счет  $\text{CO}_2$  дополнительно было добыто 218 тыс. т нефти (0,28 т на 1 т закачанного реагента).

Таблица 3

Показатели проекта по закачке  $\text{CO}_2$  в нефтяные пласты [7]

Параметры	Месторождение	
	Радаевское	Сергеевское
Пластовая температура, °С	26,5	40,0
Пластовое давление, Мпа	13,0	23,6
Вязкость нефти в пластовых условиях, мПа·с	30,7	5,85
Длительность закачки	около 6 лет	около 3 лет
Фактическая закачка на 01.07.1989 г., тыс. т	787,2	73,8
Дополнительная добыча, тыс. т	218	17,7
Удельная эффективность т нефти/т $\text{CO}_2$	0,28	0,23

Несмотря на положительный экономический эффект, закачка диоксида углерода на Радаевском месторождении в конце 1989 г. была прекращена. Причиной завершения экспериментов было низкое качество строительства углекислотопровода, что привело к его аварийному состоянию и проблемам с доставкой  $\text{CO}_2$ .

В настоящее время для реализации подобных проектов в Самарской области предложено восемь месторождений для закачки  $\text{CO}_2$  с использованием ТЭЦ в качестве источника [7]. Группой авторов был разработан способ реализации проекта, который отличается от предыдущего эксперимента в России и других мировых проектов, – газоциклическая закачка  $\text{CO}_2$  (ГЦЗ- $\text{CO}_2$ ) [6]. В первую очередь, добывающую скважину останавливают для пропитки призабойной зоны пласта, а затем закачивают в нее сжиженный диоксид углерода. После взаимодействия газа с пластовой нефтью в течение определенного периода скважина переключается на добычу. Такой цикл может повторяться до 3–6 раз. Предложенная технология осуществляется на существующих добывающих скважинах без возведения специальных нагнетательных скважин. Кроме того, при использовании ГЦЗ- $\text{CO}_2$  доставка газа

до месторождения может осуществляться автотранспортом от источников эмиссии, если они находятся в пределах 300 км [7], а не трубопроводами, строительство которых требует значительных капитальных затрат. Это позволяет снизить инвестиции и улучшить показатели экономической эффективности проекта.

В 2016 г. компания ООО «Дельта-пром инновации» представила разработанный проект реализации газоциклической закачки СКФ-СО<sub>2</sub> на Марьинском месторождении Самарской области [7]. В 2017 г. ООО РИТЭК (входящее в группу ЛУКОЙЛ) провело опытно-промышленные испытания предложенной технологии на одной из скважин этого месторождения, которая не могла эксплуатироваться при использовании традиционных способов добычи нефти. Данные испытания показали положительные результаты.

Технология секвестрации СО<sub>2</sub>, направленная на сокращение выбросов техногенного диоксида углерода, может быть использована для разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти с целью повышения коэффициента нефтеотдачи за счет увеличения извлечения остаточных запасов сырья. У проекта ГЦЗ-СО<sub>2</sub> существует ряд преимуществ и недостатков, которые необходимо учесть при его реализации. К преимуществам можно отнести снижение вязкости нефти, загущение вытесняющей воды, снижение межфазного натяжения на границе «нефть – вытесняющий агент». К недостаткам – выпадение асфальтенов, коррозию оборудования, необходимость в сепарации и улавливании СО<sub>2</sub>. В целом, возникающие сложности можно предотвратить с помощью соответствующих мероприятий (подбор правильных ингибиторов, использование оборудования с антикоррозийным покрытием, использование специализированной фонтанной арматуры).

## ЛИТЕРАТУРА

1. NOAA Research News. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2636/Rise-of-carbon-dioxide-unabated> (дата обращения 10.03.2021).

2. Статистический ежегодник мировой энергетики 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru/> (дата обращения 10.03.2021).
3. Удаление углекислого газа из воздуха. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nlo-mir.ru/tehnologi/sinteticheskoe-toplivo-iz-atmosfery-jekostartap.html> (дата обращения 10.03.2021).
4. Ромашева, Н. В Особенности мировых проектов секвестрации CO<sub>2</sub> / Н. В. Ромашева, М. Н. Крук, А. Е. Череповицын. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.e-rej.ru/Articles/2018/Romasheva.pdf> (дата обращения 15.03.2021).
5. Череповицын, А. Е. Целесообразность применения технологий секвестрации CO<sub>2</sub> в России / А. Е. Череповицын, К. И. Сидорова, Н. В. Смирнова // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – № 5, стр. 459–473. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru> (дата обращения 15.03.2021).
6. Способ газациклической закачки CO<sub>2</sub>. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/265/2652049.html> (дата обращения 10.03.2021).
7. Афанасьев, С. В. «Зеленые» технологии в нефтегазодобыче / С. В. Афанасьев, В. А. Волков, П. Э. Прохоров, А. Н. Турапин // Инновации и «зеленые» технологии: Региональная научно-практическая конференция (Самара, 29 ноября 2017 г.): сборник материалов и докладов. – Самара, 2018. – С. 102–110.
8. Опыт, испытания и перспективы Геоаккумуляции CO<sub>2</sub> с целью интенсификации нефтедобычи. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.academia.edu/37018391/Experience\\_Test\\_and\\_Prospects\\_of\\_Geoaccumulation\\_CO2\\_with\\_Increase\\_Oil\\_Recovery\\_in\\_the\\_Samara\\_Region](https://www.academia.edu/37018391/Experience_Test_and_Prospects_of_Geoaccumulation_CO2_with_Increase_Oil_Recovery_in_the_Samara_Region) (дата обращения 10.03.2021).